

В. В. Березовская, Н. Н. Озерец*, Д. С. Асанова, И. Ю. Романов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

* *ozerets@mail.ru*

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Исследовали четыре марки аустенитных коррозионно-стойких сталей 02X16H10M2, 08X15AG10D2, 06X15AG9NM2 и 09X15AG9ND2 после холодной пластической деформации и закалки от 1050 °С в воде и последующей имплантации ионами N⁺ с разной дозой облучения. Путем имплантации ионов N⁺ с высокой дозой облучения на 50–60 % повысилась твердость исследованных сталей. Повышение прочности до 20 % получено в стали с исходно низким содержанием азота 02X16H10M2.

Ключевые слова: аустенит, имплантация азота, твердость, коррозионная стойкость.

V. V. Berezovskaya, N. N. Ozerets, D. S. Asanova, I. Yu. Romanov

MODIFICATION OF THE STRUCTURE OF CORROSION-RESISTANT STEEL BY ION NITRIDING

Four marks of austenitic corrosion-resistant steels 02H16N10M2, 08H15AG10D2, 06X15AG9NM2 and 09X15AG9ND2 after cold plastic deformation and quenching from 1050 °C in water and subsequent implantation with N⁺ ions with different radiation dose were investigated. By implanting N⁺ ions with a high irradiation dose by 50–60 %, the hardness of the investigated steels has increased. The increase in strength up to 20 % is obtained in steel with an initially low nitrogen content of 02H16N10M2.

Keywords: austenite, nitrogen implantation, hardness, corrosion resistance.

По сравнению с традиционными методами химико-термической обработки ионная имплантация позволяет в десятки раз сократить время и резко понизить температуру обработки. К возможным механизмам модификации свойств поверхности можно отнести упрочнение за счет образования твердых растворов, дисперсных примесей атомов, комплексов, избыточных фаз, а также радиационных дефектов, уменьшения размера зерен матричной фазы [1–4].

Цель работы – исследовать структуру и свойства 4 марок аустенитных коррозионно-стойких сталей разного состава после бомбардировки ионами азота N^+ .

Образцы для исследования были вырезаны из тонкого (1 мм) листа 4 марок сталей 02X16H10M2, 08X15AG10D2, 06X15AG9HM2, 09X15HAG9D2, полученного при холодной прокатке с последующей закалкой от 1050 °С. По результатам рентгеноструктурного исследования структура стали до облучения в пределах точности метода состояла только из аустенита (рис. 1) и образцы не намагнитились при проверке намагничивания. Для решения поставленной цели была использована установка ионной имплантации по двустороннему облучению образцов пучком газовых ионов с энергией до 40 кэВ. Доза облучения в режиме 1 составила $4,2 \cdot 10^{15}$ ион/см², в режиме 2 – $4,2 \cdot 10^{17}$ ион/см². Концентрация внедренного азота, рассчитанная в Институте электрофизики УрО РАН, в первом случае составила 0,024, а во втором – 0,027 масс. %. После облучения образцы подвергали рекристаллизационному отжигу при 300 °С в течение 1 ч. Механические испытания образцов на одноосное растяжение проводили, согласно ГОСТ 11701–84 с использованием машины Tinius Olsen H50KS. Микроструктуру стали исследовали на металлографическом инвертированном цифровом комплексе Zeiss с использованием программы анализа изображения SIAMS 700. Твердость определяли на приборе Виккерса при нагрузке 0,049 кН.

Микроструктура (рис. 1) сталей 02X16H10M2 и 08X15AG10D2 представляла собой мелкозернистый двойникованный аустенит. Размер зерна показан в табл. 1. В стали 06X15AG9HM2 также наблюдали аустенит с двойниками отжига, но с более крупным зерном. Аустенитная структура с ультрадисперсным зерном (4 мкм) наблюдалась в стали 09X15HAG9D2.

Таблица 1

Содержание азота и размер зерна аустенита в сталях после облучения

Марка стали	Расчетное содержание азота, масс.%			Размер зерна, мкм		
	Исходное состояние	После облучения		Исходное состояние	После облучения	
		Режим 1	Режим 2		Режим 1	Режим 2
02X16H10M2	0,037	0,062	0,137	29	19	19
08X15AG10D2	0,163	0,173	0,263	26	22	19
06X15AG9HM2	0,166	0,176	0,266	63	50	43
09X15HAG9D2	0,133	0,143	0,233	4	25	23

Результаты испытаний механических свойств исследуемых сталей до ионного азотирования приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что самую низкую прочность и пластичность имеет сталь 02X16H10M2, в которой содержание азота значительно ниже, чем в остальных сталях. Наиболее

высокие свойства показали стали 08X15AG10Д2 и 09X15НАГ9Д2, в которых, помимо азота, содержится медь. Причем, это согласуется с тем, что никель повышает растворимость меди в аустените. Поэтому в стали 08X15AG10Д2 эффект деформационного старения при механических испытаниях выражен слабее, чем в стали 09X15НАГ9Д2, а, следовательно, прочность ниже.

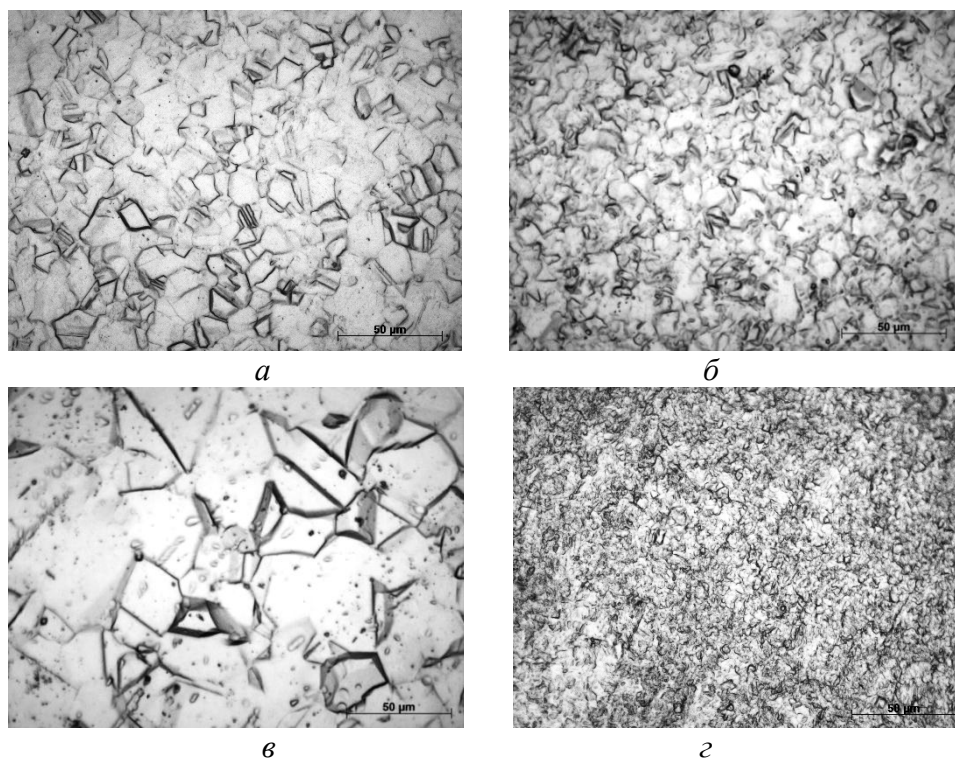


Рис. 1. Микроструктура сталей в исходном состоянии:
а – сталь 2; б – 5; в – 6; г – 15

Микроструктура всех исследованных сталей после облучения по режиму 1 и рекристаллизации выявила измельчение зерна аустенита (табл. 3, рис. 2). Вблизи зоны разрушения образцов после механических испытаний и по границам зерен некоторых образцов наблюдался мартенсит деформации, образовавшийся вдоль полос скольжения.

Значительное модифицирование структуры наблюдалось после бомбардировки ионами азота по режиму 2 (рис. 3). Параллельно с увеличением содержания азота в сталях наблюдалось уменьшение размера зерна, наиболее существенное после режима 1 (табл. 1), что связано с рекристаллизацией. Поскольку после облучения образцы подвергались отжигу при 300 °С и с учетом значительного повышения концентрации дефектности структуры в процессе облучения, измельчение зерна связано с фрагментацией зерен и разориентировкой фрагментов в результате увеличения плотности дислокаций.

Таблица 2

Механические свойства сталей

Марка стали	Режим облучения	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	φ , %
02X16H10M2	—	220	580	31	40
	1	280	650	21	30
	2	280	640	37	42
08X15AG10D2	—	520	1050	39	40
	1	450	840	22	23
	2	470	1130	46	25
06X15AG9HM2	—	370	870	43	42
	1	330	730	27	27
	2	360	930	49	41
09X15HAG9D2	—	510	970	37	40
	1	490	880	23	24
	2	460	980	48	41

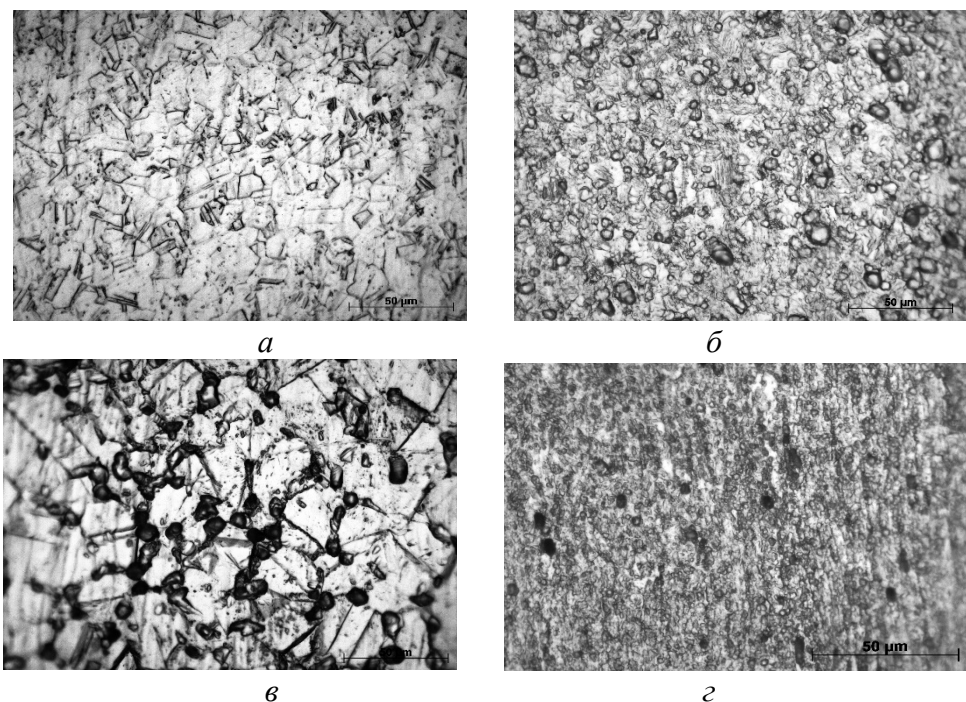


Рис. 2. Микроструктура сталей после облучения по режиму 1:
а – сталь 2; *б* – 5; *в* – 6; *г* – 15

Во всех образцах после облучения наблюдалось увеличение прочности без существенного изменения пластичности, а также твердости, что связано с увеличением плотности дефектов и появлением мартенсита деформации (табл. 2).

Выводы:

1. В стали 02X16H10M2 с низким содержанием азота (0,037 масс. %) получено повышение предела прочности на 10–20 % и твердости на 60 % путем имплантации ионов N^+ в решетку γ -твердого раствора по режиму 1, в основном за счет измельчения зерна и повышения концентрации азота.

2. В сталях с исходно более высоким содержанием азота 08X15AG10D2, 06X15AG9NM2, 09X15NAG9D2 облучение по 2 режиму эффективно для повышения твердости на 50–60 %, вызывая распад пересыщенного γ -твердого раствора с образованием избыточных фаз и мартенсита.

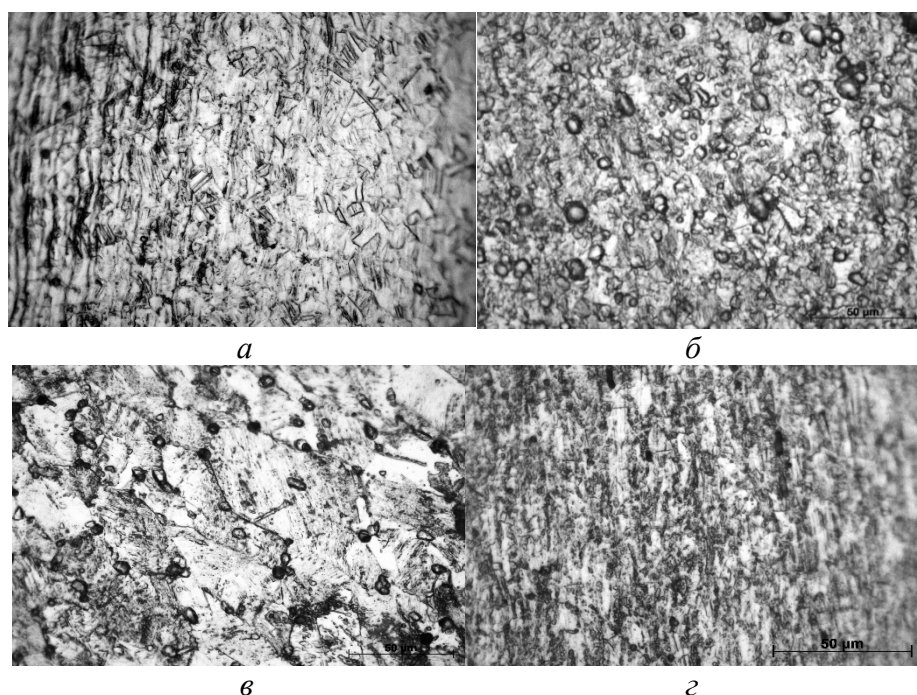


Рис. 3. Микроструктура сталей после облучения по режиму 2:
а – сталь 02X16H10M2; *б* – 08X15AG10D2; *в* – 06X15AG9NM2; *з* – 09X15NAG9D2

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин Б. А. Радиационно-пучковые технологии обработки конструкционных материалов / Б. А. Калинин // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 4. С. 5–16.
2. Гончаров В. В. Микротвердость поверхности нержавеющей стали, модифицированной ионной имплантацией / В. В. Гончаров // Проблемы машиностроения. 2013. Т. 16, № 6. С. 47–51.
3. Будзински П. Изменение свойств поверхности нержавеющей стали марки AISI316L, имплантированной азотом / П. Будзински, К. Полянски, А. П. Кобзев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. № 8. С. 80–85.
4. Повышение износостойкости стали 30XГСН2А имплантацией ионов азота и ионов металла / А. А. Ярных [и др.] // Материаловедение. 2014. № 11. С. 30–34.